

CAPITULO II. Características del Concreto de Alta Resistencia

II.1 Concreto Normal

El concreto es un material de la construcción que está hecho básicamente de agua, agregados (grava y arena), cemento y aire, gana resistencia después de un cierto tiempo de reacción con el agua. Aunque actualmente se les puede agregar otro ingrediente dependiendo su disposición final y el factor del tiempo, los denominados aditivos.

La principal característica estructural del concreto es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tensión, flexión, cortante, etc.), por este motivo es habitual usarlo asociado al acero, recibiendo el nombre de concreto armado, teniendo en conjunto un comportamiento muy favorable ante las diversas sollicitaciones a las que será sometido en la práctica.

Las principales características de un concreto normal son las siguientes:

- Resistencia a compresión: de 100 a 400 kg/cm² (10 a 40 MPa) para el concreto ordinario.
- Resistencia a flexión: proporcionalmente baja, es del orden de un décimo de la resistencia a compresión y, generalmente, poco significativa en el cálculo global.

II.2 Concreto de Alta Resistencia

El ACI (Instituto Americano del Concreto) describe que el concreto de alta resistencia, es aquel que tiene una resistencia a la compresión, $f'_c \geq 420$ kg/cm².

Mientras las N.T.C. de Concreto del RCDF 2004, lo define con una resistencia a la compresión, $f'_c \geq 400$ kg/cm².

El uso del Concreto de Alta Resistencia tiene poco mas de 50 años, fue utilizado por primera vez en 1968 en las columnas inferiores del edificio Lake Point Tower en Chicago, Illinois, teniendo una resistencia de 520 kg/cm². A partir de aquel momento se han ido empleando en forma considerable, y por ello los institutos que estudian el diseño y uso del concreto, han tenido que formular y estudiar en sus laboratorios cual es el comportamiento real de este concreto; teniendo relación directa con las proporciones y calidad de ingredientes, y como debe ser su colocación para proporcionar el mejor desempeño y seguridad de los elementos donde se ocupe.

II.2.1 Requisitos de los materiales para lograr la alta resistencia

Se requieren al menos las siguientes características en los materiales que componen el concreto con fines de que tenga una alta resistencia a la compresión:

- Cemento. Son recomendables los tipos I y II, con contenidos significativos de silicato tricálcico (mayores que los normales), módulo de finura alto y composición química uniforme.
- Grava. De alta resistencia mecánica, estructura geológica sana, bajo nivel de absorción, buena adherencia, de tamaño pequeño y densidad elevada.
- Arena. Bien graduada, con poco contenido de material fino plástico y módulo de finura controlado (cercano a 3.00).
- Agua. Requiere estar dentro de las normas establecidas.
- Mezcla. Relaciones agua/cemento bajas (de 0.25 a 0.35), mezclado previo del cemento y del agua con revolvedora de alta velocidad, empleo de agregados cementantes, período de curado más largo y controlado, compactación del concreto por presión y confinamiento de la mezcla en dos direcciones.
- Aditivos. Es recomendable emplear alguno o una combinación de los aditivos químicos: superfluidificantes y retardantes; y, de los aditivos minerales, ceniza volante, microsíllica o escoria de alto horno.
- Cenizas Volantes. Son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía, deben tener conformidad con la norma ASTM C 618.
- Escorias Molidas de Alto Horno. Son productos no metálicos producidos en un alto horno, producto del hierro, se usa escoria bien molida de alto horno cumpliendo con la norma ASTM C989.
- Humo de Sílice. Es un material puzolanico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferro-silíceo., deben cumplir con la norma ASTM C1240.

II.2.2 Procedimientos de mezclado

Cuando el parámetro más importante por obtener es alta resistencia a la compresión, es conveniente emplear bajas relaciones agua/cemento, cuidando esencialmente la trabajabilidad del concreto y, en consecuencia, su revenimiento. En términos generales, el procedimiento de mezclado requiere, entre otros factores, mezclado previo del cemento y del agua con una revolvedora de alta velocidad, uso de aditivos, empleo de agregados cementantes, periodo más largo de curado, de ser posible con agua, compactación del concreto por presión y confinamiento del concreto en dos direcciones.

Adicionalmente, para la producción de este tipo de concretos son indispensables el empleo selectivo de materiales, un enfoque diferente en los

procedimientos de diseño y elaboración de las mezclas, atención especial en la compactación y un control de calidad más riguroso. Algunos investigadores usan como técnicas para la producción de concretos de alta resistencia su composición, una alta velocidad de mezclado y revibrado, y eventualmente la adición de algún aditivo para incrementar la resistencia del concreto.

II.3 Uso y Aplicación de los Concretos de Alta Resistencia

Diversos estudios han demostrado que la economía que representa utilizar un concreto de alta resistencia, se puede ver representada directamente en el tamaño de los elementos estructurales, y en especial las columnas para los edificios de gran altura, de mediana altura y los de baja altura.

Debido a que se reducen los tamaños de los elementos estructurales, produce un material más durable y resistente, y aparte, porque en el sometimiento a un análisis dinámico, se ha podido demostrar que produce menor desplazamiento lateral, y con ello le da más resistencia a la rigidez lateral y al acortamiento axial del edificio.

Otro aspecto importante del uso de Concretos de Alta Resistencia es que además pueden disminuir el uso de tamaños diversos de cimbras para la estructura de soporte, debido a que se puede iniciar usando un concreto de alta resistencia en los niveles inferiores y en los niveles posteriores, únicamente se disminuye la resistencia, esto conlleva a mantener iguales las dimensiones de los elementos en todo el edificio.

El uso cada vez mayor del concreto de alta resistencia a tenido su contra, debido a que muchos de los reglamentos actuales no tienen cubierto todo este campo, y con ello se tiene el resultado de aclarar y reformular las teorías sobre el comportamiento detallado de los elementos estructurales empleando concreto de alta resistencia.

Hasta la fecha existen diversas investigaciones a escala nacional e internacional para la obtención de procedimientos de elaboración de concretos de alta resistencia; incluso, como se menciono anteriormente, en algunas partes se han construido edificios usando concretos de este tipo. Y por ello, los institutos de concreto se han dado la tarea de investigar los siguientes puntos:

- ✚ Características necesarias en los materiales que componen el concreto para lograr alta resistencia a la compresión.
- ✚ Aditivos recomendables para lograr alto comportamiento en el concreto.
- ✚ Revisión de los procedimientos de mezclado y de dosificación propuestos en cada una de las referencias analizadas.

II.4 Comportamiento de Columnas de Concreto de Alta Resistencia

Cuando se piensa estudiar el diseño de un edificio utilizando este material, es sumamente importante tener en cuenta que existen ciertas Normas y Reglamentos correspondientes según el caso de estudio y proyecto. Una de las principales metas de estos Reglamentos es que se apliquen y que la persona que tenga a bien el utilizarlos, tenga en cuenta que sus fórmulas son puramente empíricas elaboradas en un laboratorio y por lo cual, siempre habrá una discrepancia con un resultado final y real.

Este hecho ha tenido como resultado el surgimiento de desconfianza que los requisitos para el diseño y el detallado, de ciertos elementos estructurales hechos con concreto reforzado en Reglamentos diferentes, son prácticamente empíricos y están básicamente desarrollados a partir de los resultados arrojados de pruebas de ensayos de especímenes que tienen resistencias de compresión por debajo de los 400 kg/cm².

Debido a ello se emprendió el estudio de los casos, en los que con frecuencia están sometidos los elementos estructurales “columnas”, para después, poder hacer la diferencia y encontrar si había ventajas o no en el uso de concreto de alta resistencia.

Por tal motivo el ACI y ASCE empezaron a estudiar y a realizar ensayos a partir de 1998 en EUA, de dos tipos de casos, en los cuales se deseaba observar el desempeño de columnas de concreto de alta resistencia.

- ✚ Desempeño de Columnas de Concreto de Alta Resistencia Bajo Carga Axial Concéntrica.
- ✚ Desempeño de Columnas de Concreto de Alta Resistencia bajo la Acción Combinada de Carga Axial y Momento de Flexión.

II.4.1 Desempeño de Columnas de Concreto de Alta Resistencia Bajo Carga Axial Concéntrica.

En el caso del desempeño de “Columnas de Concreto de Alta Resistencia Bajo Carga Axial Concéntrica”, se encontró que las características esfuerzo-deformación de concreto de alta resistencia, recubrimiento de concreto, y de los parámetros relacionados con el confinamiento del acero tienen una gran influencia en la respuesta de columnas de concreto sometida a esta prueba.

La figura 3 muestra una respuesta esquemática de la deformación por carga axial bajo cargas concéntricas de columnas de concreto de alta resistencia con refuerzo transversal. A medida que se incrementa la resistencia del concreto, la porción ascendente de la curva se acerca a una línea recta. Por lo general la

capacidad de carga axial que soporta la columna viene dada por la ecuación 1 que nos proporciona el reglamento del ACI318-05.

$$P_o = 0.85f'_c (A_g - A_s) + A_s f_y \quad (\text{ec.1})$$

Donde

P_o = Capacidad de Carga Axial pura de las columnas calculada de acuerdo con la ecuación de resistencia nominal del ACI 318-05

f'_c = Resistencia a compresión del concreto

A_g = Área total de la sección transversal de la columna

A_s = Área del acero longitudinal

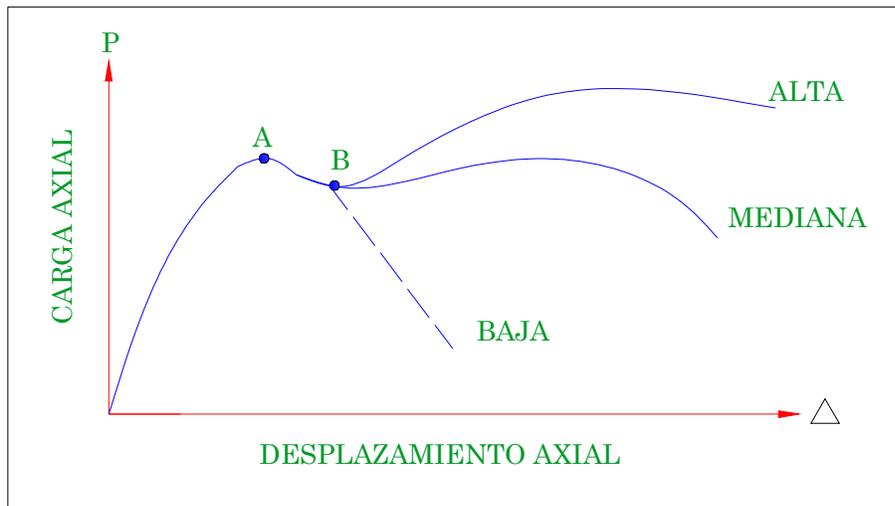


Fig. 3.- Comportamiento esquemático de columnas de concreto de alta resistencia sometidas a cargas axiales concéntricas axiales, con cantidades bajas, medianas y alta de refuerzo transversal de acuerdo al ACI318-05.

La resistencia a fluencia del acero de confinamiento transversal determina el límite superior de la presión de confinamiento. Una presión más alta de confinamiento aplicada al concreto del núcleo, a su vez, da como resultado resistencia y ductilidad alta. El refuerzo longitudinal y transversal bien distribuido da como resultado un área más grande de concreto efectivamente confinado y una distribución más uniforme de la presión de confinamiento, mejorando con ello la efectividad del refuerzo de confinamiento. En el caso de concreto de resistencia normal, se ha demostrado que el arreglo del refuerzo transversal y el refuerzo longitudinal lateralmente soportado, tiene influencia significativa en la resistencia y ductilidad de las columnas. Y utilizando concreto de alta resistencia se obtuvieron como resultados resistencia y ductilidad alta, todo cuando se hizo una distribución y acomodo adecuado del acero de refuerzo, con ello obtenemos como resultados valiosos el incremento de la fluencia y ductilidad de la estructura en general, que resulta muy positivo para el diseño estructural del proyecto.

II.4.2 Resultados obtenidos del Desempeño de Columnas de Concreto de Alta Resistencia bajo la Acción Combinada de Carga Axial y Momento Flexionante.

En regiones como la Ciudad de México, debe tomarse muy en cuenta para el diseño estructural de los edificios altos, el riesgo de sismos, debido a que cuando este se presenta tiende a cambiar la manera en que se distribuyen las fuerzas debidas a las acciones producidas por tal fenómeno. Las consecuencias que pueden tener las columnas de concreto de alta resistencia en cuanto a cómo se van a comportar dentro de una región sísmica, ha hecho que los estudios y ensayos que se hacen a los cilindros sean bajo otras condiciones, a comparación que si se encontraran en una zona de baja sismicidad.

Como resultado, del cumulo de las investigaciones reportadas, sobre el desempeño de las columnas de concreto de alta resistencia, ha sido principalmente estudiar y comprender el comportamiento sísmico de estas columnas. Algunos de estos estudios también han presentado datos que podrían ser usados para evaluar la capacidad de flexión de las columnas sometidas a la acción de cargas combinadas. Sin embargo cabe señalar, que la información recopilada y disponible para las columnas de concreto de alta resistencia sometidas a cargas combinadas, es mucho menor que los datos obtenidos de ensayos de columnas de concreto de alta resistencia bajo cargas concéntricas.

No existe un acuerdo universal sobre la aplicabilidad de los requisitos del Reglamento ACI 318-05, para calcular la resistencia a flexión de las secciones de columnas de concreto de alta resistencia, sometidas a la acción de carga axial y momento flexión. En las columnas que generalmente diseñamos, utilizamos la suposición de que existe un bloque rectangular de esfuerzos, el cual fue el resultado de pruebas de columnas sometidas a carga axial y momento flexión, de tal modo que allí se tuviera el eje neutro en una cara del espécimen de prueba.

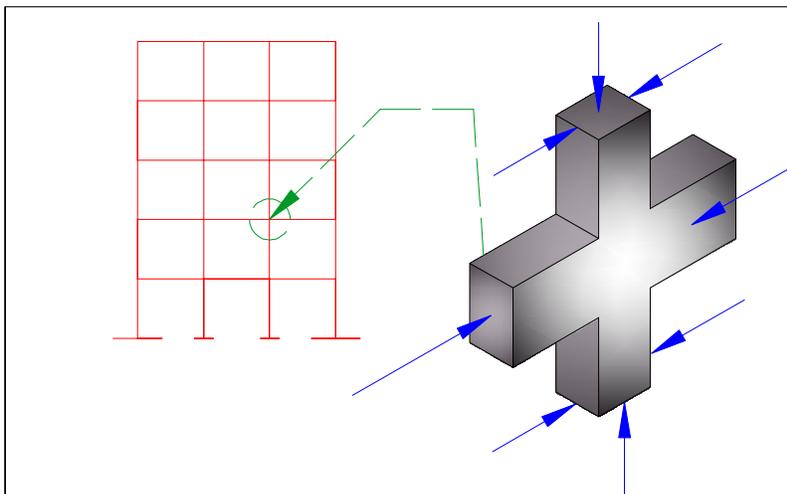


Fig. 4.- Vista General de un Espécimen de Prueba

II.5 Comparación de Concreto de Alta Resistencia vs. Otros Materiales

Las alternativas que se plantean habitualmente en el tipo de edificios altos son la estructura metálica y la constituida con Concreto de Alta Resistencia, repitiendo que este último alcanza una resistencia característica superior a los 400 kg/cm².

De esta última se pueden mencionar las siguientes ventajas frente a la primera:

- 1) Mayor rigidez y, por tanto, mejor comportamiento ante acciones horizontales.
- 2) Mayor amortiguamiento intrínseco.
- 3) Menor costo del material.
- 4) En algunas ocasiones, condicionantes locales y de mercado dificultan el acceso a elementos metálicos en la cantidad necesaria; los materiales constitutivos del concreto prácticamente siempre están accesibles con la calidad mínima requerida.
- 5) Más fácil conservación, sobre todo en estructuras expuestas a la acción de los agentes medioambientales.
- 6) Mejor comportamiento ante la acción del fuego.
- 7) Frente a estos argumentos, la tipología metálica puede esgrimir, básicamente, una mayor rapidez de ejecución.

Otra alternativa, en realidad una variante de la del Concreto de Alta Resistencia, es la estructura de concreto normal (aquél cuya resistencia a la compresión es igual o inferior a 400 kg/cm²). Sin embargo, y aunque en el proyecto y ejecución de edificios altos se está empleando este tipo de concretos, los primeros presentan frente a ellos las siguientes ventajas:

1. Las secciones de las columnas (elementos dimensionados, básicamente, frente a esfuerzos de compresión) son más reducidas.
2. Su módulo de elasticidad es más elevado y, por tanto, tienen un menor acortamiento debido a esfuerzos axiales.
3. La deformación de los elementos estructurales horizontales (vigas y entrepisos), para un mismo peralte, es menor.
4. El peso propio global de la estructura es inferior, pudiendo suponer cierta reducción de la cimentación.
5. El plazo de ejecución de la obra se puede ver reducido al permitir menor tiempo de cimbrado, tanto de elementos horizontales como de muros y columnas.
6. Aumento de la vida útil de la estructura del edificio. El incremento de la resistencia característica del concreto lleva asociada una mayor capacidad y, por tanto, una mayor resistencia ante el ataque de agentes agresivos externos al mismo.

II.6 Grafica de Interacción empleando comparativa de Concreto Reforzado vs Concreto de Alta Resistencia Reforzado

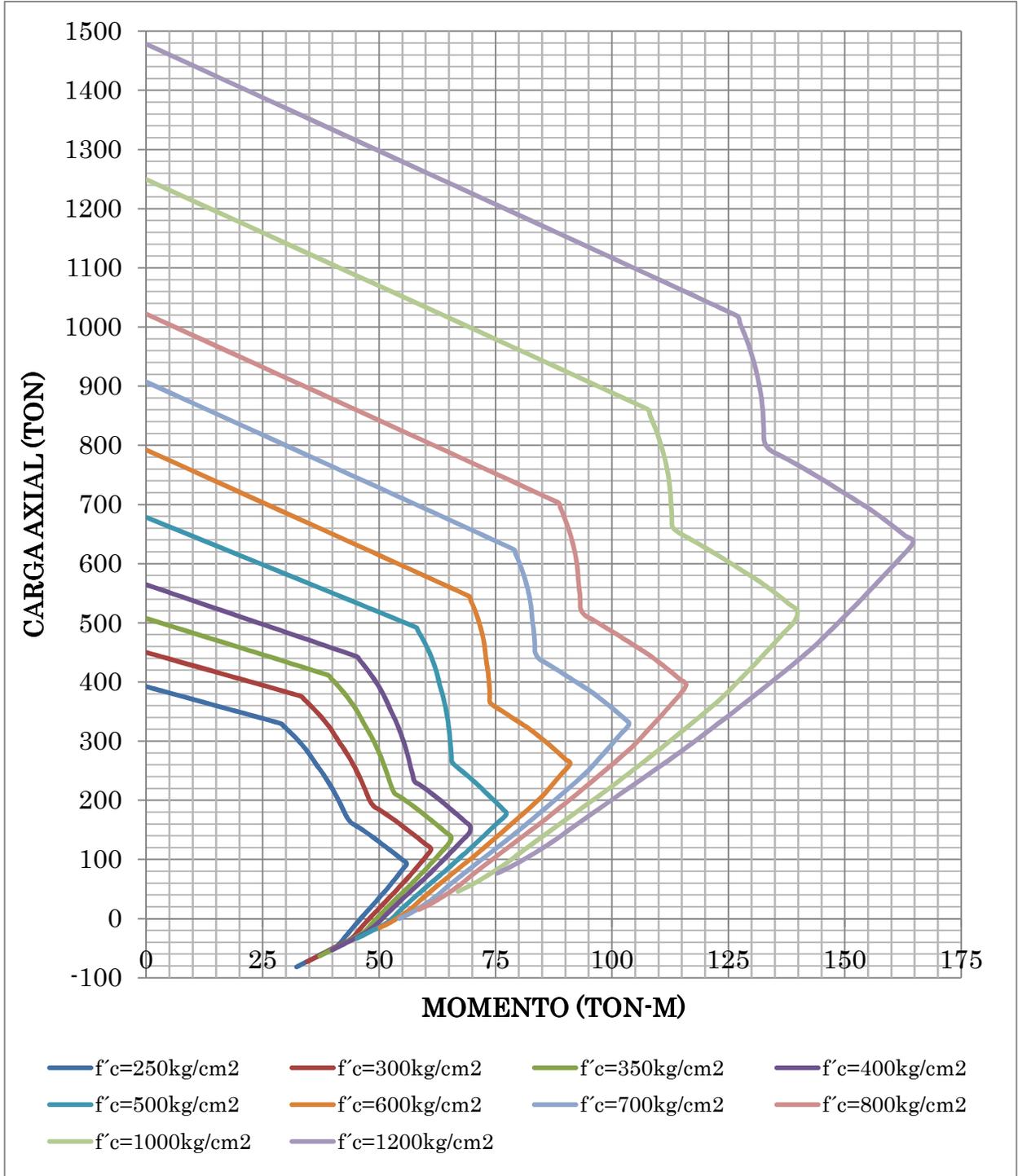


Fig.5.- Grafica de Interacción de una Columna rectangular de 40 x 60 cm y As= 12 #6.

Para la elaboración del diagrama anterior se ha utilizado el Reglamento de Construcción del DF, en sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.

Con el cual se emplearon las formulas e hipótesis para obtener los puntos necesarios para elaborar la grafica anterior.

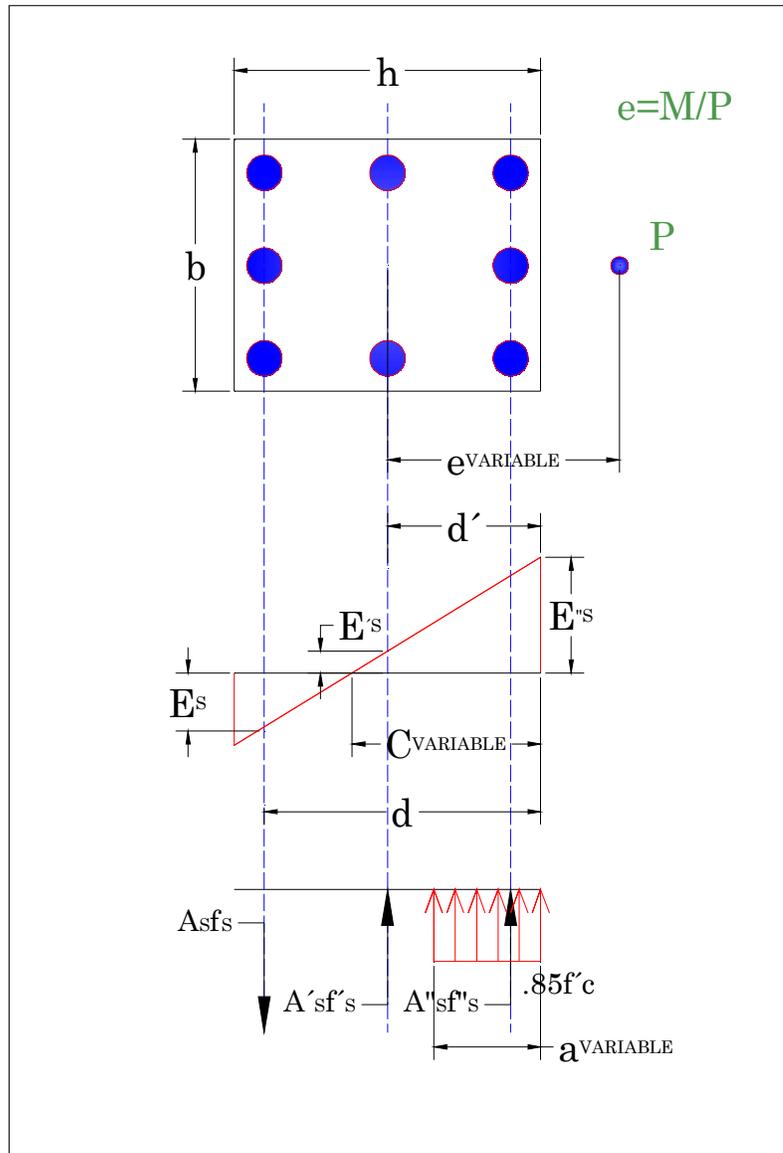


Fig. 6.- Hipótesis de cálculo para Diagramas de Iteracion de una Columna

Equilibrio de Fuerzas:

$$P_n = 0.85 f'_c (ab - A'_s) + A'_s f''_s + A_s f'_s - A_s f_s$$

(ec. 2)

Equilibrio de los momentos:

$$M_n = 0.85 f'_c (ab - A'_s) \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A''_s f''_s \left(\frac{h}{2} - d'' \right) + A_s f_s \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (\text{ec. 3})$$

Compatibilidad de deformación de acero a tensión:

$$\frac{\epsilon_s}{d-c} = \frac{\epsilon_u}{c}, \text{ sustituyendo } \epsilon_s = \frac{f_s}{E_s} \text{ y despejando: } f_s = E_s \epsilon_u \frac{d-c}{c} \leq f_y \quad (\text{ec. 4})$$

Compatibilidad de deformación de acero a compresión:

$$\frac{\epsilon'_s}{c-d'} = \frac{\epsilon_u}{c}, \text{ sustituyendo } \epsilon'_s = \frac{f'_s}{E_s} \text{ y despejando: } f'_s = E_s \epsilon_u \frac{c-d'}{c} \leq f_y \quad (\text{ec. 5})$$

$$\frac{\epsilon''_s}{c-d''} = \frac{\epsilon_u}{c}, \text{ sustituyendo } \epsilon''_s = \frac{f''_s}{E_s} \text{ y despejando: } f''_s = E_s \epsilon_u \frac{c-d''}{c} \leq f_y \quad (\text{ec. 6})$$

FALLA A TENSIÓN

Usar un valor de "c" menor a "cb", $f_s = f_y$, y calcular "f's" y "f''s" de acuerdo a las ecuaciones de compatibilidad de acero a compresión. Luego calcular "P" y "M" de las ecuaciones de equilibrio.

FALLA A COMPRESIÓN

Usar un valor de "c" mayor a "cb", calcular "fs", "f's" y "f''s" de ecuaciones de compatibilidad de deformaciones. Luego calcular "P" y "M" de las ecuaciones de equilibrio.

FALLA CON CARGA CONCÉNTRICA ($e = 0$, $M=0$)

$$P_o = 0.85 f'_c A_g + A_s f_y \quad (\text{ec. 7})$$

FACTORES DE RESISTENCIA SEGÚN EL TIPO DE FALLA

FR=0.8 cuando el elemento falle en tensión
FR=0.7 cuando el elemento falle en compresión

Utilizando este método es posible hacer las gráficas de Interacción para cualquier tipo de columna, únicamente hay que ir variando la profundidad de "c", para obtener los diferentes tipos de combinaciones de carga axial y momento.

II.7 Grafica de q-Momento para Vigas de Concreto Reforzado y Concreto de Alta Resistencia

Se hará una gráfica posteriormente utilizando el criterio para Secciones Rectangulares sin Acero de Compresión (ec. 8) de las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, la cual define el cálculo del momento resistente de la sección como a continuación se escribe.

$$M_R = F_R b d^2 f_c'' q (1 - 0.5q) \quad (\text{ec. 8})$$

Donde

$$q = \frac{p f_y}{f_c''} \quad (\text{ec. 9})$$

$$p = \frac{A_s}{bd} \quad (\text{ec. 10})$$

F_R es el factor de resistencia, para flexión se tomara igual a 0.9
 b es el ancho de la sección
 d es el peralte efectivo de la sección
 f_c'' es el esfuerzo uniforme de compresión = $0.85 f_c^* = 0.85 (0.8 f_c')$

y el bloque de compresión se calcula con la siguiente ecuación

$$a = \frac{A_s f_y}{f_c'' b} \quad (\text{ec. 11})$$

La profundidad del bloque de compresión se calculara con la siguiente condición:

$$\beta_1 = 0.85 \quad \text{Sí } f_c^* \leq 280 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{ec. 12})$$

$$\beta_1 = 1.05 - \frac{f_c^*}{1400} \geq 0.65 \quad \text{Sí } f_c^* > 280 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{ec. 13})$$

Acero mínimo de refuerzo para flexión

$$A_{S,\min} = \frac{0.5 \sqrt{f_c'}}{f_y} \times bd \quad (\text{ec. 14})$$

Acero Balanceado de refuerzo para flexión

$$A_{S,\max} = \frac{f_c''}{f_y} \frac{6000 \beta_1}{f_y + 6000} \times bd \quad (\text{ec. 15})$$

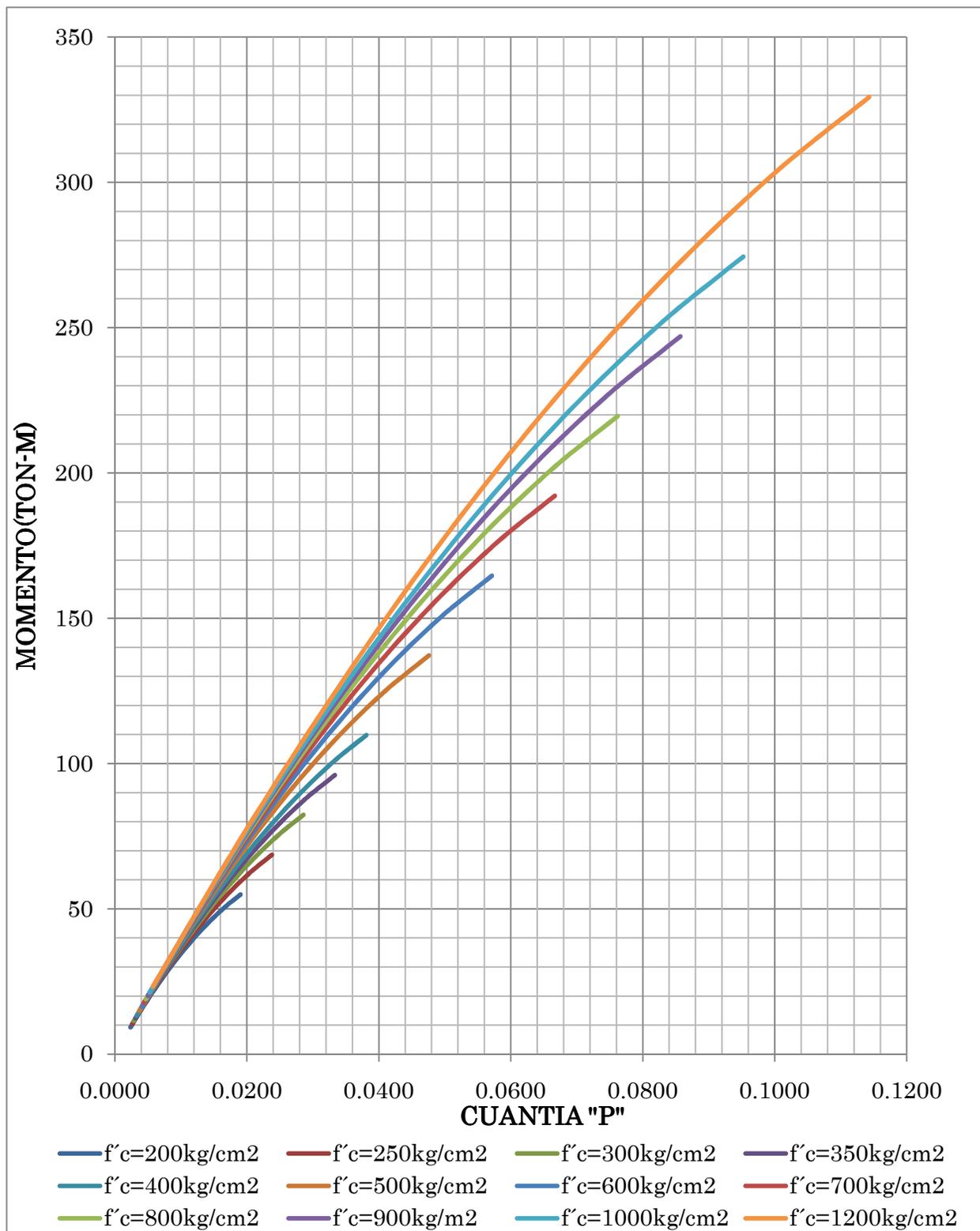


Fig.7.- Grafica Momento-Cuantía de Acero una sección simplemente armada empleando las NTCD de Concreto del RCDF-04, donde se graficó “q” y “momento de la sección”, variando la cantidad de acero a tensión y manteniendo una sección transversal de 30cm x 60cm de una viga

$f'c$ (kg/cm ²)	f^*c (kg/cm ²)	$\beta_1=$	$f'c$ (kg/cm ²)	As bal (cm ²)	p	q	Mr (Ton.m)	AS min (cm ²)	a (cm)
100	80	0.85	68	14.57	0.00810	0.50	24.786	3.00	15
150	120	0.85	102	21.86	0.01214	0.50	37.179	3.67	15
200	160	0.85	136	29.14	0.01619	0.50	49.572	4.24	15
250	200	0.85	170	36.43	0.02024	0.50	61.965	4.74	15
300	240	0.85	204	43.71	0.02429	0.50	74.358	5.20	15
350	280	0.85	238	51.00	0.02833	0.50	86.751	5.61	15
400	320	0.82	262.86	54.43	0.03024	0.48	93.628	6.00	14.50
500	400	0.76	305.71	58.90	0.03272	0.45	103.564	6.71	13.49
600	480	0.71	339.43	60.51	0.03362	0.42	108.694	7.35	12.48
700	560	0.65	364	59.65	0.03314	0.38	109.417	7.94	11.47
800	640	0.65	416	68.17	0.03787	0.38	125.048	8.49	11.47
900	720	0.65	468.00	76.69	0.04261	0.38	140.679	9.00	11.47
1000	800	0.65	520.00	85.21	0.04734	0.38	156.310	9.49	11.47
1100	880	0.65	572.00	93.73	0.05207	0.38	171.941	9.95	11.47
1200	960	0.65	624.00	102.25	0.05681	0.38	187.572	10.39	11.47

Tabla 1.- Memoria de Cálculo donde se ejemplifica cual fue la manera en que se elaboró la gráfica anterior y con el cual se observa el comportamiento de una viga ante el incremento del $f'c$

Como una conclusión de las gráficas y de las iteraciones que se realizaron para obtener la tabla anterior, podemos darnos cuenta que en una sección para viga hecha con concreto de alta resistencia puede estar muy desaprovechada, debido a que el mismo concreto al tener una alta resistencia a la compresión, provoca cambios negativos en la profundidad del bloque de compresión, un acortamiento a la distancia “a”.

Debido a ello, conociendo el tema de diseño de vigas, sabemos que parte de la viga estará a tensión y que la otra a compresión, y por las hipótesis de diseño, se sabe que el concreto no resiste el esfuerzo a tensión, por lo cual el área que quede por arriba o abajo del bloque de compresión, será un área desperdiciada y que no contribuirá como era de esperarse al emplear el concreto de alta resistencia.

Por este motivo es muy frecuente que los elementos estructurales que son diseñados con concreto de alta resistencia sean por lo general las columnas y no las vigas, aunque esto no es necesario, si por razones de diseño es necesario utilizar este concreto, también puede emplearse, aunque también debemos abordar el tema de los costos del concreto de alta resistencia, contra la aportación que dará a la estructura.

II.8 Comparación de los Módulos de Elasticidad según los Reglamentos ACI318-05 y el RCDF-2004

El módulo de Elasticidad según el ACI318-05 se define con la siguiente ecuación y la cual se aplicara para todo tipo de resistencia del concreto:

$$E_c = 57000\sqrt{f'c} \quad (\text{psi})$$

$$E_c = 15100\sqrt{f'c} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (\text{ec. 16})$$

El módulo de Elasticidad según el RCDF-2004 en su NTCD de Estructuras de Concreto menciona dos consideraciones: una para concreto normal y otra para concretos de alta resistencia.

Para concretos con $f'c \leq 400 \text{ kg/cm}^2$, el módulo de elasticidad E_c , se supondrá igual a

$$E_c = 14000\sqrt{f'c} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (\text{ec. 17})$$

Para concretos de alta resistencia, $f'c > 400 \text{ kg/cm}^2$, el módulo de elasticidad E_c , se supondrá igual a

$$E_c = 8500\sqrt{f'c} + 110000 \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (\text{ec. 18})$$

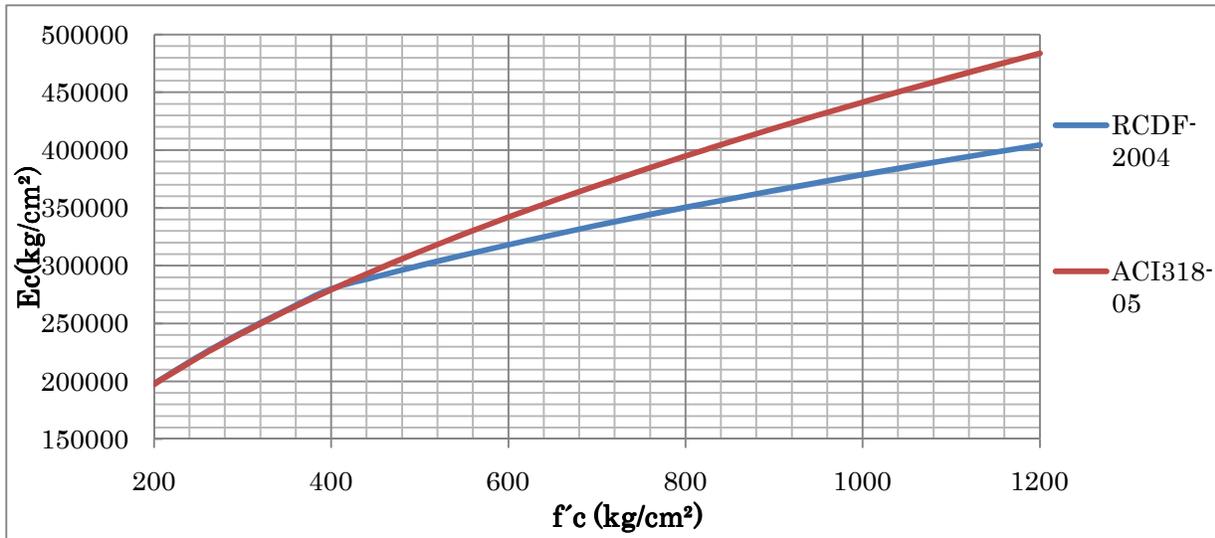


Fig. 8.- Grafica comparativa de los módulos de elasticidad del concreto, variando el $f'c$ y aplicando los criterios de Acuerdo a los Reglamentos ACI318-05 y el RCDF-2004

Como una conclusión de lo anterior, podemos observar que entre más alto sea la resistencia a compresión del concreto $f'c$ mas alto será el módulo de elasticidad y con ello podremos obtener ciertas ventajas para los cálculo de la rigidez y con ellos disminuir deformaciones en la estructura.